

3D spausdinimo technologijų pritaikymas šokoladui spausdinti

Vijolė Bradauskienė¹, Gintaras Kučinskas^{*2}, Dovilė Monkutė-Kazlauskienė¹,
Loreta Monkuvienė¹

¹Klaipėdos valstybinės kolegijos Maisto technologijų ir mitybos katedra,
Bijūnų g. 10, LT-91223 Klaipėda. Tel. 8 655 38385,

²Klaipėdos valstybinės kolegijos Inžinerijos ir informatikos katedra,
Bijūnų g. 10, Klaipėda, el. paštas g.kucinskas@kvk.lt

(Gauta 2020 m. balandžio mėn.; atiduota spaudai 2020 m. gegužės mėn.; prieiga internete nuo 2020 m. gegužės 11 d.)

Anotacija

Straipsnyje apžvelgiamos maisto 3D spausdinimo technologijos ir parenkamos labiausiai tinkamos šokoladui, pateikiami 3D spausdintuvo mazgo, skirto spausdinti šokoladu, kūrimo etapai, parenkami spausdinimo parametrai. Atlikus bandymus su standartiniu belgišku šokoladu, pastebėta, kad jo reologinės savybės tobulintinos: trūksta takumo ir atspausdinti gaminiai lėtai stingsta, todėl buvo nuspręsta pakeisti šokolado sudėtį įdedant nedidelį kiekį bičių vaško. Optimalus vaško priedo kiekis 1 % buvo nustatytas juslinio vertinimo būdu. Spausdinimo parametrų parinkimas buvo pagrįstas vizualiniu stebėjimu ir fizinėmis spausdinimo savybėmis.

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdinimas, skaitmeninė gastronomija.

Abstract

The article reviews the technology of 3D printing of food products, and the most suitable ones for chocolate are selected, the stages of development of a 3D printer unit for chocolate printing are presented, and printing options are selected. Tests with standard Belgian chocolate showed that its rheological properties needed to be improved: there was a lack of fluidity, and the printed products slowly hardened, therefore it was decided to change the composition of the chocolate by adding a small amount of beeswax. The optimal beeswax content of 1% was determined by sensory evaluation. The selection of printing parameters was based on the visual observation and physical properties of the printed products.

Key words: 3D printing, digital gastronomy

Įvadas

Trijų dimensijų (3D) spausdinimas – tai vientiso erdvinio objekto gaminimas iš skaitmeninio modelio. 3D spausdinimo pritaikymo galimybės nuolat plečiasi. Erdvinius gaminius galima spausdinti iš įvairių medžiagų: plastiko, metalų, gumos, stiklo ir kt. Dalis 3D spausdintuvų gali spausdinti kelias medžiagas vienu metu. 3D technologijas galima pritaikyti ir maistui spausdinti, tačiau kol kas pasaulyje šios spausdinimo technologijos dar kūrimo stadijoje – egzistuoja keletas prototipų, jie bandomi ir tobulinami.

Kompanijos, orientuotos į technologijų kūrimą, ieško būdų, kaip būtų galima efektyviai padauginti gaminius. Sukūrus maisto spausdinimo technologijas, būtų galima lengviau aprūpinti maistu vis didėjantį žemės gyventojų skaičių. Jas galima naudoti tiek maisto pakuočių gamybai, tiek gaminant maistą. Pirmą kartą 2001 m. įmonė „Nanotek Instruments“ pagamino ir užpatentavo savo gaminius naudodama specialiai konditerijos gaminiams skirtą trimatį spausdintuvą. 2008 m. buvo sukurtas „Philips“ maisto spausdintuvas, turintis specialias maisto produktų kasetes ir galintis sluoksniais spausdinti specialiai jam pritaikytus maisto produktus. 2009 m. įmonė „Electrolux Design Lab“ parodoje gamino maistą iš įvairių medžiagų, naudodama 3D spausdintuvus (robotinę ranką). Šis pasirodymas buvo kaip molekulinės virtuvės dalis. NASA taip pat kuria 3D maisto spausdintuvus, naudojamus maisto gamybai kosmonautams (Aldanmaz ir Sever, 2017). Vienos kompanijos bando atspausdinti dirbtinę mėsą, kitos – konditerijos ar šokolado gaminius. Mokslininkai teigia, kad 3D spausdinimo technologijos greitai bus sujungtos į 3D spausdinimo ekosistemą, kuri apims maisto, vaistų, organų ir audinių spausdinimą.

Erdvinis maisto spausdinimas, taip pat žinomas kaip maisto sluoksnių gamyba (Wegrzyn ir kt., 2012), buvo tiriamas naudojant įvairias maisto matricas. 3D spausdinimo metu erdvinis objektas

yra pagaminamas sukuriant nuoseklius skirtingų formų sluoksnius pagal kompiuterinio projekto duomenis (Liu ir kt., 2017). Naudojant šią technologiją gali būti sumaišomos ir apdorojamos specifinės medžiagos suteikiant joms įvairias sudėtingas formas ir struktūras, kurių neįmanoma arba ekonomiškai neapsimoka gaminti tradiciniais gamybos būdais (Yang ir kt., 2017). 3D maisto produktų spausdinimo taikymas gali būti pagrįstas dviem aspektais (Luimstra, 2014): 1) naujų maistinių medžiagų sukūrimas ir potencialus bet kurių maisto medžiagų naudojimas bei 2) tradicinių maisto produktų išvaizdos ir tekstūros pagerinimas kontroliuojant maisto medžiagas makro- ir mikrostruktūriniu lygiu.

Pastaraisiais metais paskelbta nemažai straipsnių, susijusių su naujų maisto produktų gamyba naudojant spausdinimą (Godoi ir kt., 2016; Dankar ir kt., 2018). Tokiu būdu siekiama sukurti sveikus žmogui ir aplinkai produktus (Lipton ir kt., 2015; Ivanova ir kt., 2013). Skaitmeninė gastronomija leidžia keisti sudedamąsias dalis ir jų kiekius atsižvelgiant į mitybos poreikius ir individualius pageidavimus (Zoran ir Coelho, 2011), todėl gali būti naudojama gaminti maisto produktus vartotojams, kurie turi specifinių poreikių ir kuriems reikalinga griežtai kontroliuojama dieta: sportininkams, sergantiems ir pagyvenusiems žmonėms arba asmenims, turintiems problemų kramtyti ar nuryti maistą (Lipton ir kt., 2015). Spausdinant personalizuotą maistą, didelis dėmesys skiriamas jo sudėčiai kontroliuojant bendrą kalorijų, pridėtų makro- ir mikroelementų kiekį.

Maisto medžiagų savybių ir sudėties supratimas yra labai svarbus šiame procese, medžiagos turi būti tokios, kad galėtų būti išstumtos iš purkštuko, jos turi išlaikyti struktūrą spausdinimo metu ir po jo (Godoi ir kt., 2016; Yang ir kt., 2017). Atliekami medžiagų spausdinimo bandymai, kuriais nustatomos maisto medžiagų reologinės savybės: klampumas, gelio sudarymo, lydymosi ir kietėjimo savybės (Gross ir kt., 2014) bei juslinės savybės. 3D spausdinimui visi ingredientai iš anksto paruošiami kaip tyrės arba milteliai, todėl gaminio charakteristikos turi būti įvertintos po spausdinimo, pvz., išvaizda, objekto stiprumas ir stabilumas po kaitinimo (Lipton, 2015). Naudojant natūralias maisto medžiagas 3D spausdinimui dažnai sunku užtikrinti tinkamą jų konsistenciją (Liu ir kt., 2019). 3D maisto spausdinimo efektyvumui padidinti gali būti naudojamas platus priedų asortimentas, įskaitant hidrokoloidus (dažniausiai ksantaną ir želatiną), krakmolą ir cukrų (Cohen ir kt., 2009). Šios medžiagos padeda pasiekti norimą tekstūrą ir išlaikyti pageidaujamą 3D spausdinto maisto formą po spausdinimo (Mantihal ir kt., 2017).

Kaip teigia Mantihal (2017), Chen ir Mackley (2006), viena tinkamiausių spausdinti maisto medžiaga yra šokoladas. Spausdinimo galimybė yra susijusi su gebėjimu būti išspaudžiamam iš purkštuko ir pasluoksniu nusodinimo galimybė išlaikant formą (Hao ir kt., 2010), tačiau šiuo metu pasaulyje naudojamos 3D spausdinimo technologijos yra gana brangios ir Lietuvos rinkoje mažai prieinamos, todėl nuspręsta ištirti tradicinių 3D spausdinimo technologijų, skirtų formuoti plastiko gaminius, pritaikymo šokoladui spausdinti galimybes, parinkti tinkamą šokolado sudėtį ir spausdinimo parametrus.

Šio tyrimo **tikslas** – įvertinti 3D spausdintuvo pritaikymo galimybes šokoladui spausdinti.

Tyrimo metodai ir priemonės

Bandymų stendui buvo panaudota:

„Arduino Uno“ valdiklis; naudojama sukurta mikroprograma (*firmware*) – žingsninio variklio sukimosi kryptiai, sukimosi greičiui ir trukmei valdyti.

Žingsninio variklio valdymo modulis (*driver*) „ULN2003“.

5V 4 fazių žingsninis variklis „28BYJ-48“.

60 ml medicininis švirkštas su sutrumpinta adata (siekiant sumažinti šokolado atvėsimą ir stingimą adatoje).

Rankiniu būdu iš 0,5 mm nichromo vielos pagamintas šildymo elementas. Atliekant bandymus parinktas toks vielos ilgis, kad 12 V maitinimo įtampa (neribojant srovės) leistų palaikyti apie 50 °C temperatūrą.

Maitinimui panaudotas standartinis 150W kompiuterio maitinimo blokas.

Šildymo elemento maitinimui naudotas nuolatinės reguliuojamos įtampos ir srovės laboratorinis maitinimo blokas „HY3005E2“.

Suprojektuota ir atspausdinta iš plastiko tvirtinimo struktūra.

Suprojektuota ir atspausdinta iš plastiko dantračių sulėtinimo sistema (perdavimo koeficientas 5:1).

3D maisto spausdintuvui naudota įranga:

3D FDM technologijos spausdintuvas (rinkinys) „HE3D I3“ skirtas spausdinti plastiką.

Pirminiam mazgo prototipui panaudotas viešai prieinamas sprendimas, skirtas spausdinti keramikos mase - <https://www.thingiverse.com/thing:482873>.

Projektuojant ir gaminant modulį buvo atlikti papildomi darbai.

Prie šildymo elemento prijungtas temperatūros daviklis „NTC100K“ – automatiniam šokolado temperatūros palaikymui.

Spausdintuvui dėl valdymo patogumo pakeista mikroprograma (firmware) į „Marlin 1.1.9“.

3D spausdintuvo mazgo konstrukcijai panaudota talpa, kaitinimo elementas su grįžtamoju ryšiu, sliekinė pavara, tvirtinimas.

Bandymams naudotas belgiškas šokoladas iš UAB „Minordija“, kurio sudėtinės dalys: cukrus, kakavos masė, kakavos sviestas, emulsiklis: (saulėgrąžų lecitinas), kvapioji medžiaga (vanilė). Sudėtyje ne mažiau kaip 44 % kakavos sausųjų medžiagų. Cheminės / fizinės šokolado charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Cheminės / fizinės šokolado charakteristikos
Table 1. Chemical / physical characteristics of chocolate

Medžiagos	Matavimo vienetai	Kiekis
Viso cukrų	%	54,5±3,0
Viso riebalų	%	25,4±2,0
Sausųjų kakavos medžiagų	%	> 44
Sausųjų neriebalinių kakavos medž.	%	>14
Kakavos sviesto	%	>18
Drėgmė	%	<1,5

Tyrimų / bandymų metodai ir priemonės

Šildymo elemento temperatūra buvo matuojama nekontaktiniu termometru „UT100C“.

Parentant *spausdinimo parametrus*, remtasi **vizualiniu stebėjimu** (šokolado sluoksnio padengimas, konsistencija, sluoksnio storis ir t. t.), fizinėmis spaudinio savybėmis (erdvinės struktūros stabilumas, paviršiaus struktūra).

Parentant spausdinimo *medžiagos (šokolado) sudėtį* buvo atliktas juslinis vertinimas. Šokolado juslinį įvertinimą atliko 6 vertintojų komanda. Šokoladas buvo vertinamas pagal 5 rodiklius, kurie išskirti remiantis Popov-Raljić ir Laličić-Petronijević (2009) naudota šokolado juslinio vertinimo metodika: spalvą, kvapą, lūžį, skonį, tirpumą burnoje. Rodikliai buvo vertinami balais 1-5, balų apibūdinimas: 5 – puikus, būdingas šokoladui, 4 – geras, būdingas šokoladui; 3 – vidutiniškas, juntamas vaškas; 2 – nemalonus, intensyviai juntamas vaškas ir 1 – nepriimtinas.

Tyrimo rezultatai ir jų aptarimas

3D maisto spausdinimo technologijos ir spausdintuvo konstrukcijos parinkimas.

Dažniausiai 3D maisto spausdintuvams naudojama FDM (*Fused Deposition Modeling*) technologija – greitai stingstančios maisto masės lydymas kaitinant ir pasluoksninis stingdymas, tokiu būdu sukuriant erdvinę struktūrą. 3D spausdintuvus valdanti programinė įranga vykdo produktų spausdinimą pagal erdvinius skaitmeninius modelius (Luimstra, 2014).

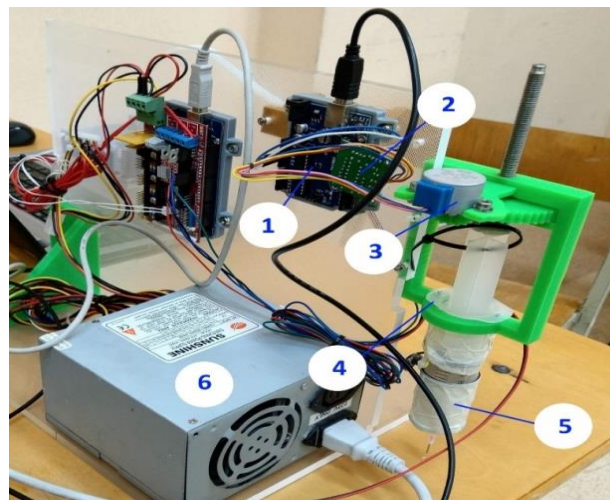
Erdvinio spausdinimo procesas prasideda nuo 3D modelio sukūrimo skaitmeninėje aplinkoje. Suprojektuotas virtualus modelis yra padalinamas į atskirus sluoksnius su „pjaustymo“ programine įranga, iš kurių sugeneruojami kodai spausdinimui. Šiuos sugeneruotus kodus galima siųsti į 3D

spausdintuvą (Sun ir kt., 2015). Spausdinamoji medžiaga išlydoma iki tšios būsenos ir per tam skirtą purkštuką plonu sluoksniu (priklausomai nuo medžiagos ir spausdintuvo galimybių – nuo 0,05 iki 5 mm.) dengiama ant paviršiaus. Spausdinimo galvutė juda taip, kad ant paviršiaus sukurtų vieną spausdinamo objekto sluoksnį. Tokiu būdu, sluoksnis po sluoksnio sukuriamas pilnas erdvinis objektas. Ore spausdinamoji medžiaga vėl sustingsta, dažniausiai papildomai vėsinant. Kyle ir kt. (2014) įrodė, kad efektyviam aušinimui į 3D spausdintuvą galima integruoti skysto azoto aušinimo sistemą.

Taigi nuspręsta šokoladui spausdinti pasirinkti FDM technologiją, nes ji leidžia spausdinti visomis (tarp jų – ir maisto) medžiagomis, kurios stingsta ore normalioje arba šiek tiek žemesnėje temperatūroje. Pagrindiniai iššūkiai spausdinant tokiu būdu – spausdinimo medžiagos sudėties parinkimas (kad atitiktų temperatūros ir skonio parametrus), jos tiekimas iki spausdinimo galvutės, spausdinimo temperatūros režimas, spausdinimo medžiagos tiekimo greitis, galvutės judėjimo greitis, sluoksnio storis ir aktyvaus jau atspausdintos dalies šaldymo parametrai.

3D maisto spausdintuvai paprastai susideda iš rėmo, mechaninių sandariklių, talpų, spausdinimo mazgo, valdymo grandinės ir variklio. Spausdinimo metu gali būti automatiškai maišomi įvairūs ingredientai, remiantis tam tikrais pasirinktais receptais, ir tai gali būti atliekama be operatoriaus, įvedant išplėstinius nustatymus (Yang ir kt., 2017).

3D spausdintuvo mazgo spausdinimui šokoladu prototipo kūrimas. Bandymų stendo kūrimas. Prieš kuriant prototipą, buvo sukurtas bandymų stendas, skirtas patikrinti lydyto šokolado mechanines ir temperatūros savybes. Po bandymų buvo suprojektuotas, atspausdintas (naudojant 3D spausdinimo plastiką FDM technologiją) ir išbandytas papildomas mazgas 3D spausdintuvams – spausdinimui šokoladu. Spausdinimo lydytu šokoladu bandymų stendas (**Klaida! Nerastas nuorodos šaltinis.**) skirtas ištirti lydyto ir stingstančio šokolado reologines savybes prie tam tikrų temperatūrų bei šildymo elemento konstrukcinio sprendimo patikrinimui.



1 pav. Šokolado masės tiekimo ir temperatūros palaikymo stendas

1 – valdiklis; 2 – žingsninio variklio valdiklis; 3 – žingsninis variklis; 4 – švirkštas šokolado masei; 5 – šildymo elementas švirkštui; 6 – maitinimo blokas.

Fig. 1. Stand for supplying chocolate mass and maintaining temperature

1 – controller; 2 – driver; 3 – stepper motor; 4 – syringe for chocolate mass; 5 – heating element for syringe; 6 – power supply

Stendas leido valdyti švirkšto stūmoklio judėjimo kryptį, greitį ir trukmę bei rankiniu būdu (keičiant maitinimo įtampą) keisti švirkšto turinio temperatūrą – intervale nuo kambario temperatūros iki maždaug +60 °C.

Bandymų rezultatai parodė, kad lydyto šokolado masė gali būti spaudžiama per 0,6–0,8 mm diametro adatą. Nustatyta, kad iš išspausto per adatą šokolado gali būti formuojamos daugiausiai keturių sluoksnių struktūros. Deja, bet lėtas šokolado stingimo greitis ir mechaninis tvirtumas

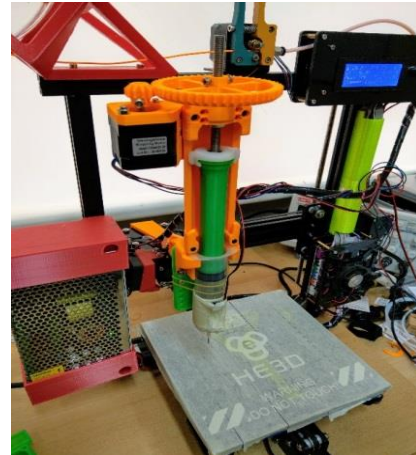
nebuvo pakankami 3D spausdinimui – erdvinės struktūros daugiau nei 5 sluoksnių nebeišlaikydavo savo formos.

Spausdintuvo pritaikymas šokoladui spausdinti. Tolimesniems bandymams spausdinti šokoladu buvo specialiai paruoštas 3D spausdintuvas HE3D I3. Suprojektuotas ir atspausdintas (iš plastiko FDM technologija) papildomas spausdinimo šokoladu modulis 3D spausdintuvui (**Klaida! Nerastas nuorodos šaltinis.**).



2 pav. Papildomas spausdinimo šokoladu modulis 3D spausdintuvui

Fig. 2. Optional chocolate printing module for 3D Printer



3 pav. Modulis, sumontuotas „HE3D EI3“ 3D spausdintuve

Fig.3. Module mounted on HE3D EI3 3D Printer

Pirminio mazgo prototipas buvo perprojektuotas spausdinimui šokoladu. Projektuojant buvo siekiama, kad modulio naudojimui reikėtų kaip galima minimaliau keisti spausdintuvo mechanines ir elektronines savybes. Šis tikslas buvo pasiektas – moduliui sumontuoti reikia atsukti du iš keturių spausdinimo galvutę laikančių varžtų ir, įdėjus tvirtinimo elementą (su moduliui), prisukti jį vienu varžtu. Modulis jungiamas į spausdintuvo pagrindinę plokštę, į jungtį, skirtą papildomo spausdinimo mazgo pajungimui. Kaitinimo elemento ir temperatūros daviklio jungtys jungiamos į atitinkamas pagrindinės plokštės papildomo kaitinimo mazgo jungtis. Modulis buvo prijungtas prie 3D spausdintuvo valdymo sistemos – tai leido automatiškai valdyti tiek šokolado tiekimą, tiek švirkšto turinio temperatūrą. Buvo sukurtas programinis profilis su reikalingais temperatūriniais ir mechaniniais parametrais – spausdintuvas paruoštas spausdinti šokoladu.

Šokolado sudėties tyrimai. Atliekant bandymus stende, pavyko suformuoti 4 sluoksnių struktūrą, tačiau nustatyta, kad esant aplinkos temperatūrai 19 °C, suformuotas šokolado gaminytis stingo per lėtai, stingstantis šokoladas neturėjo reikalingo mechaninio tvirtumo. Šokoladinių gaminių spausdinimui pagerinti galima naudoti keletą strategijų, pvz. tikslios temperatūros kontrolę ekstruzijos metu, šokolado dalelių dydžio optimizavimą ir priedų panaudojimą. Taikant temperatūros kontrolę siekiama paskatinti stabilesnių β kristalų susidarymą su patobulintomis tekstūros, blizgesio ir skambesio savybėmis. Šokolado dalelių dydžio sumažinimas palengvina lydymą spausdinimo proceso metu (Afoakwa ir kt., 2009). Svarbu suprasti šokolado riebalų lydymosi ir kristalizacijos procesus. 3D spausdinto šokolado fizinės savybės ir pojūtis burnoje priklauso nuo laiko ir temperatūros palaikymo po nusodinimo. Mulji ir Mackley (2003) ištyrė šokolado mikrostruktūros ir mechaninių savybių pasikeitimus ekstruzijos metu ir įrodė, šokolado ekstruzijos metu pakyla jo temperatūra dėl fazės pokių (daugiausia riebalų kristalizacijos). Temperatūros pakilimas mažesnis, kai padidinamas išspaudimo skersmuo. Temperatūros pakilimas priklauso ir nuo šokolado sudėties, t. y. tamsaus šokolado, kuriame mažiau riebalų, temperatūra pakyla daugiausiai, o mažiausiai – pieniško. Pieno riebalų ir kakavos sviesto santykinis kiekis

pieniniame šokolade neturėjo reikšmingo poveikio temperatūros profiliui (Yang, 2017). Atsižvelgiant į tai, nuspręsta keisti šokolado masės sudėtį.

Buvo atliekami bandymai įdedant į šokolado masę papildomai kakavos sviesto nuo 2 iki 10 proc. Buvo tikėtasi pagreitinti šokolado stingimo laiką ir išgauti tvirtesnę tekstūrą, tačiau eksperimentas nepateisino lūkesčių, visais atvejais gauta masė sunkiai stingo, o nustačius žemesnę temperatūrą, masė išstrigdavo spausdinimo antgalyje.

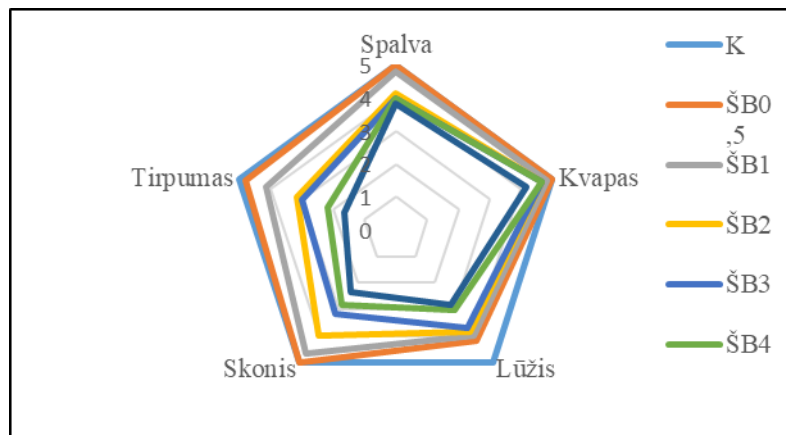
Mantihal ir kt. (2019) ištyrė magnio stearato priedo įtaką spausdinamų šokolado gaminių kokybei. Bandymais buvo nustatytas optimalus magnio stearato kiekis (5 g 100 g tarkuoto šokolado sudėtyje), todėl buvo pasiektas geresnis spausdinamumas, nes MgST priedas spausdinimo proceso metu veikia kaip lubrikantas ir kaip medžiagos stipriklis. Buvo nuspręsta vykdyti bandymus su natūralia medžiaga, panašia į magnio stearatą – bičių vašku. Bičių vaškas yra lengvai prieinamas rinkoje, pigesnis už MgST, o svarbiausia, natūralus produktas, nedideli jo kiekiai turi teigiamą poveikį vartotojų sveikatai (Bogdanov, 2004). Vaško į šokolado masę dėta nuo 1 iki 10 % ir fiksuota lydymosi bei stingimo temperatūra bei laikas (2 lentelė).

2 lentelė. Fizinės šokolado charakteristikos
Table 2. Physical chocolate characteristics

Mėginys	ŠB5		ŠB4		ŠB3		ŠB2		ŠB1		ŠB0,5		K	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
Šokoladas (44 %)	47,5	95	48	96	48,5	97	49	98	49,5	99	49,75	99,5	50	100
Bičių vaškas	2,5	5	2	4	1,5	3	1	2	0,5	1	0,25	0,5	0	0
Lydymosi temperatūra, °C	39		37		35		34		32		32		31	
Stingimo laikas	55 min.		52 min.		50 min.		48 min.		45 min.		40 min.		35 min.	

Vaško priedas (1–5 %) padarė šokoladą lengviau išspaudžiamą, jis geriau formavosi, tačiau sustingęs šokoladas ragavimo metu sunkiau tirpo burnoje, jo paviršius buvo šiek tiek lipnus.

Buvo atliktas šokolado juslinis vertinimas siekiant nustatyti, koks bičių vaško priedas būtų priimtinas vartotojams. Vertinimo rezultatai pateikiami 4 pav.



4 pav. Šokolado su skirtingo dydžio bičių vaško priedu juslinis vertinimas
Fig.4. Sensory evaluation of chocolate with added beeswax of different amounts

Juslinio vertinimo rezultatai parodė, kad didinat į šokoladą dedamo bičių vaško priedo kiekį, šokolado kokybiniai rodikliai ir priimtumas mažėja proporcingai, šokoladas su 0,5–1 % bičių vaško priedu buvo vertinamas puikiai arba gerai, o su 2–5% – gerai ir vidutiniškai. Didžiausią įtaką priedas turi šiems rodikliams: tirpumui burnoje, skoniui ir lūžiui. Kadangi šokolado kokybę išreiškia blizgesio ir lūžio savybės, kurios priklauso nuo β kristalų susidarymo ir stabilumo (Afoakwa ir kt., 2009), svarbu suprasti šokolado riebalų ir bičių vaško lydymosi ir kristalizacijos procesus. Šokolade esantis kakavos sviestas lydosi esant 31 °C, o vaško lydymosi temperatūra yra

70 °C, todėl vaško priedas padidina šokolado lydymosi temperatūrą, bet paspartina ir jo stingimą. Stingimo laiko sumažinimas yra vienas iš tokiu būdu gaunamos šokolado spausdinimo masės privalumų, tačiau bičių vaško priedas ir pakeisti temperatūros šokolado formavimo režimai pablogina β kristalų susidarymo sąlygas, kas nulemia žemesnius šokolado juslinius rodiklius.

Įvertinus bičių vaško priedo suteikiamus privalumus spausdinimo procese ir siekiant užtikrinti pakankamus juslinius rodiklius, rekomenduojama spausdinimui naudoti šokolado masę su ne didesniu kaip 1 % bičių vaško priedu.

Spausdinimo lydytu šokoladu parametru parinkimas. Pasak Hao ir kt. (2010), svarbiausi parametrai spausdinant šokoladą yra ekstruzijos greitis, tekėjimo per purkštuką greitis ir antgalio aukštis nuo spausdinimo pagrindo, taigi atlikti bandymai, siekiant euristiniu būdu nustatyti šokolado su 1 % bičių vaško spausdinimo parametrus naudojant 3D spaudinių paruošimo ir spausdintuvo valdymo programą „Simplify 3D 4.0.0“. Atkreiptinas dėmesys, kad šie parametrai nėra universalūs ir priklauso tiek nuo techninės, tiek nuo programinės įrangos.

- **Purkštuko diametras – 0,6 mm.** Nustačius didesnę diametrą padidėja šokolado tiekimas, formuojasi paviršiaus nelygumai. Mažesnis diametras sutankina brėžiamas linijas, adata kabina prieš tai nubrėžtą liniją, apsivelia šokoladu.
- **Šokolado tekėjimo greitis – x50 nuo nominalaus** (nustačius šokolado talpos diametrą 15 mm). Per mažas greitis suformuoja pertrūkius padengime, per didelis – šokolado „kalną“, kurio paviršių sugadina kito sluoksnio spausdinimas.
- **Spausdinimo greitis – 10 mm/s.** Mažinant greitį šokoladas paviršių dengia netolygiai, atsiranda pertrūkių. Didinant greitį, atsiranda šokolado perteklius su visomis neigiamomis pasekmėmis.
- **Sluoksnio storis – 0,7 mm.** Mažinant storį, šokoladas nebeteka per tarpą tarp pagrindo ir adatos, adata pradeda kimštis. Didinant storį, atsiranda šokolado perteklius.
- **Naudojama viena papildoma linija (skirt) adatai nuvalyti – 10 mm** nuo spaudinio). Kadangi nėra mechanizmo, stabdančio savaiminį šokolado tekėjimą adata, keli pirmieji centimetrai spausdinami su nepilnu šokolado kiekiu.
- **Tiek išorės, tiek vidaus užpildymui naudojamos tiesios linijos.** Naudojant įvairius užpildymo raštus, spaudinys gautas „suveltas“. Tam įtakos turėjo spausdinimo medžiaga – naudojant šokoladą labai sudėtinga išgauti smulkias detales.
- **Vidinis spaudinio užpildymas – 50 %.** Didinant užpildymą, gaunamas šokolado perteklius, tuo tarpu mažesnis užpildymas neužtikrina spaudinio tvirtumo.
- **Spausdinimo temperatūra – 45 °C.** Buvo bandoma naudoti tiek aktyvų (ventiliatorius), tiek pasyvų (atdaras langas) spaudinio vėsinimą, tačiau tai teigiamų rezultatų nedavė – šokoladas pradėdavo stingti adatoje ir ją kimšti. Aukštesnė spausdinimo temperatūra (50 °C) kiek akivaizdesnių teigiamų rezultatų nedavė, žemesnė – išprovokavo adatos užsikimšimą.

3D spausdintuvo pritaikymo galimybės šokoladui spausdinti. Įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad tinkamai parinkus sudėtį, nors ir nepilnai sustingęs, šokoladas gali laikyti formą (maždaug 5–7 cm aukščio struktūras – priklauso nuo spausdinamo objekto formos). Spausdinimas vyksta labai lėtai – maždaug 1 cm aukščio ir 7 cm diametro cilindrinis pilnaviduris objektas (logotipas) buvo spausdinamas daugiau kaip dvi valandas. Spausdinimo greitis tinkamas parametru bandymams ir prototipams kurti, tačiau per mažas pramoniniam naudojimui. Pastebėta, kad maždaug po 3 valandų spausdinimo šokoladas švirkšte pradeda savaime kristalizuotis (nežiūrint į palaikomą temperatūrą), spausdinimo adata pradeda kimštis. Tikėtina, kad tai vyksta dėl šokolade vykstančių kristalizacijos procesų, kurie prasideda ten, kur yra didžiausias judėjimas (švirkšte prie adatos pagrindo). Numatyta ateityje išbandyti indukcinį adatos šildymą. Spausdinant šokoladu nepavyko išgauti pakankamai smulkių detalių – dėl lydyto šokolado takumo. Mažiausias formuojamas objektas buvo maždaug 3–4 mm skersmens. Iš dalies taip yra dėl to, kad nėra

numatytas būdas, kaip „sulaikyti“ lydytą šokoladą adatoje, kai vykdomas spausdinimo galvutės perkėlimas į kitą vietą. Nustatyta, kad spausdinant šokoladu vidinis užpildymas atlieka svarbų vaidmenį, kad produktas būtų stabilus.

Išvados

1. 3D spausdinimo technologija yra daug žadanti, ekologiškai švari maisto gamybos technologija, turinti gerą kokybės kontrolę, didelį energijos vartojimo efektyvumą ir mažas sąnaudas. Kaip minėta, daugiasluksnis spausdinimas yra labai patrauklus ne tik dėl galimybės išgauti sudėtingas maisto formas, bet gali būti taikomas ir naujiems maisto produktams kurti, siekiant išbandyti įvairius maisto ingredientų derinius arba pritaikyti mitybą individualiems poreikiams. 3D spausdintuvai yra taikomi maisto pramonėje, tačiau jie turi trūkumų – specializuoti 3D maisto spausdintuvai brangūs ir sudėtingos konstrukcijos.
2. Įvertinus skirtingas 3D maisto spausdinimo technologijas, pasirinktas kurti 3D spausdintuvo mazgo spausdinti šokoladu prototipas, veikiantis FDM technologijos pagrindu.
3. Išbandžius skirtingos sudėties šokoladą, nustatyta, kad tinkamiausias spausdinimui šokoladas su ne daugiau kaip 1 % bičių vaško priedu. 3D šokolado spausdinimui parinkti parametrai: purkštuko diametras (0,6 mm), šokolado tiekimo greitis (50 nuo nominalaus), spausdinimo greitis (10 mm/s), sluoksnio storis (0,7 mm), tiek išorės, tiek vidaus užpildymui naudojamos tiesios linijos, vidinis spaudinio užpildymas (50 %.), spausdinimo temperatūra (45 °C).

Literatūra

1. Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Vieira, J. (2009). Microstructure and mechanical properties related to particle size distribution and composition in dark chocolate. *International journal of food science & technology*, 44(1), 111-119.
2. Aldanmaz, E. A., & Sever, R. (2017). Gıdaların Dizaynında 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisi Uygulamaları.
3. Amza, C., Zapciu, A., & Popescu, D. (2017). Paste Extruder—Hardware add-on for desktop 3D printers. *Technologies*, 5(3), 50.
4. Antlej, K., Leen, R., & Russo, A. (2016). 3D food printing in museum makerspaces: creative reinterpretation of heritage. *KnE Engineering*, 1-7.
5. Bogdanov, S. (2004). Beeswax: Quality issues today. *BeeWorld* 85: 46–50. 31.
6. Chen, Y. W., & Mackley, M. R. (2006). Flexible chocolate. *Soft Matter*, 2(4), 304-309.
7. Dankar, I., Haddarah, A., Omar, F. E., Sepulcre, F., & Pujola, M. (2018). 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 231-242.
8. Dankar, I., Pujolà, M., El Omar, F., Sepulcre, F., & Haddarah, A. (2018). Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree-food additive complexes on extrusion-based 3D printing. *Food and bioprocess technology*, 11(11), 2021-2031.
9. Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54.
10. Gostner, A., Schäffer, V., Theis, S., Menzel, T., Lührs, H., Melcher, R., ... & Kozianowski, G. (2005). Effects of isomalt consumption on gastrointestinal and metabolic parameters in healthy volunteers. *British journal of nutrition*, 94(4), 575-581.
11. Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., & Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences, 3240-3253.
12. Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57-64.
13. Holub, I., Gostner, A., Hessdörfer, S., Theis, S., Bender, G., Willinger, B., ... & Scheppach, W. (2009). Improved metabolic control after 12-week dietary intervention with low glycaemic isomalt in patients with type 2 diabetes mellitus. *Hormone and metabolic research*, 41(12), 886-892.
14. Ivanova, O., Williams, C., & Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 353-364.
15. Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215, 13-22.
16. Lipton, J. I., Cutler, M., Nigl, F., Cohen, D., & Lipson, H. (2015). Additive manufacturing for the food industry.

- Trends in Food Science & Technology*, 43(1), 114-123.
17. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, Y. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 83-94.
 18. Liu, L., Meng, Y., Dai, X., Chen, K., & Zhu, Y. (2019). 3D Printing Complex Egg White Protein Objects: Properties and Optimization. *Food and Bioprocess Technology*, 12(2), 267-279.
 19. Luimstra, J. (2014). The Future: A 3D Printed "Insects" Meal. <http://3dprinting.com/materials/edibles-food/future-3d-printed-insects-meal/>.
 20. Mantihal, S., Prakash, S., Godoi, F. C., & Bhandari, B. (2017). Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling. *Innovative food science & emerging technologies*, 44, 21-29.
 21. Pusch, K., Hinton, T. J., & Feinberg, A. W. (2018). Large volume syringe pump extruder for desktop 3D printers. *HardwareX*, 3, 49-61.
 22. Rosales, C. K., Klinkesorn, U., & Suwonsichon, S. (2017). Effect of crystal promoters on viscosity and melting characteristics of compound chocolate. *International Journal of Food Properties*, 20(1), 119-132.
 23. Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J. Y., Hong, G. S., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308-319.
 24. Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y., & Hong, G. S. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and bioprocess technology*, 8(8), 1605-1615.
 25. Yang, F., Zhang, M., & Bhandari, B. (2017). Recent development in 3D food printing. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(14), 3145-3153.
 26. Wegrzyn, T. F., Golding, M., & Archer, R. H. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 27(2), 66-72.
 27. Zoran, A., & Coelho, M. (2011). Cornucopia: the concept of digital gastronomy. *Leonardo*, 44(5), 425-431.

Application of 3D Printing Technologies for Chocolate Printing

(Received in April, 2020; Accepted in May, 2020; Available Online from 11th of May, 2020)

Summary

The aim of the article to evaluate the applicability of a 3D printer for chocolate printing. A literature review was performed. There was designed and developed 3D printer unit for chocolate printing. The selection of printing parameters was based on visual observation and physical properties of the printing products. Sensory evaluation was used to select the composition of the print material (chocolate). There were reviewed existing 3D food printing technologies and printer designs.

A test bench was developed to check the mechanical and temperature properties of melted chocolate. The results of the tests showed that melted chocolate can be extruded by 0,6- 0.8 mm needle and can be formed into at least four layers structures. Unfortunately, the slow setting speed and mechanical strength of the chocolate were not enough for 3D printing - the mechanical structures over 5 layers no longer retained their shape.

After the tests, an additional unit for 3D printers - printing with melted chocolate - was designed, printed (using 3D plastic printing FDM technology) and tested. Works were performed during the design and production of the module: the temperature sensor "NTC100K" was connected to the heating element, printer firmware was changed to Marlin 1.1.9, the new module was connected to a 3D printer control system, software profiles with the required temperature and mechanical parameters were created.

During chocolate composition study, the beeswax from 1 to 10 % was added to the chocolate mass and melting and solidification temperatures and times were fixed. A sensory evaluation of the chocolate was performed to determine which beeswax supplement would be acceptable to consumers. In view of the advantages of the beeswax additive in the printing process and in order to ensure proper organoleptic characteristics, it is recommended to use chocolate with a maximum of 1% beeswax additive for printing.

In summary: 3D printers are used in the food industry, but they have drawbacks - specialized 3D food printers are relatively expensive and complex. Taking different 3D food printing technology, it was decided to build a 3D printer unit to print chocolate prototype of acting FDM technology basis. After testing the chocolate of different composition, the most suitable composition for printing was determined where the amount of beeswax additives should be not more than 1%. The print settings of the 3D printer are selected according to nozzle diameter, chocolate extrusion speed, print speed, layer thickness; one additional line (dedicated) is used to clean the needle; straight lines are used for both external and internal filling, internal print filling, and printing temperature.